中国家庭消费间接碳排放空间关联结构演变
——基于社会网络分析法

付　伟[1]，　巩海秀[1]，　陈建成[2]
（1. 西南林业大学经济管理学院，云南 昆明　650233；2. 北京林业大学经济管理学院，北京　100083）

摘　要： 把握家庭消费间接碳排放的空间聚类及结构特征对于中国在新发展格局下实现“双碳”目标具有重要意义。在测算出中国家庭消费间接碳排放量的基础上，运用社会网络分析法探究2013—2022年中国家庭消费间接碳排放空间关联网络结构特征。结果表明：(1) 家庭消费间接碳排放量整体呈上升趋势，10 a间增长了1.2倍；其中“食品”“居住”“交通通信”和“教育文化娱乐”为主构成部分，占总量的75%。(2) 整体网络特征：以江苏、北京、浙江、上海等省市为中心，呈“核心-边缘”分布趋势。其中，网络密度和关联数有所下降，等级梯度和关联密度有所上升。(3) 块模型特征：按照节点溢出和接收效应划分为四大板块，即“净溢出”“净受益”“经纪人”和“双向溢出”，各板块在空间关联领域中扮演不同角色。(4) 个体网络特征：上海、江苏、浙江等省市中心度最高位于关联网络的核心区域，空间关联性影响显著，具有向外辐射的特点，而青海、黑龙江等省份处于关联网络边缘区域，关联效应较弱。

关 键 词： 家庭消费间接碳排放；空间关联网络；社会网络分析；引力模型
文章编号： 1000－6060(2025)01－0119－11(0119～0129)

气候变化严重制约人类社会可持续发展，成为全球关注的热点话题[1-2]。中国作为碳排放第一大国，有义务承担绿色减排任务，并于2020年在第75届联合国代表大会上宣布力争实现“3060”目标，这意味着中国要在最短时间内实现全球碳排放强度最大降幅[3-4]。面对如此艰巨的减排任务，需要找到突破口实现精准碳减排。以往关于碳排放的研究大多聚焦于工业生产领域的直接能源排放，却忽视了居民消费是生产资料的最终消耗者，应承担相应减排责任[4-5]。尤其是在中国工业化进程日益完善和扩大内需政策的双向驱动下，消费端碳排放量已超过生产端，成为节能降碳的重点关注领域[4]。家庭作为居民经济社会活动的基本单位[6-8]，要想实现精准减排需从家庭消费着手，促进消费模式低碳转型，将减排任务落到实处[9]。

家庭消费碳排放是指满足人们日常生活所需要的商品和服务过程中所产生的间接能耗，Bin等[10]、Fan等[11]将家庭消费过程中使用的商品和服务产生的碳排放称为家庭消费间接碳排放，本文在总结现有文献的基础上将家庭生活消费划分为八大类，对应模块产生的碳排放量总和称为家庭消费间接碳排放。作为国际碳减排研究的新兴分支，家庭消费碳排放受到学者广泛关注，并围绕着测算方式、时空特征等多方面展开研究[5,12]。关于测算方式，采用消费者生活方式方法、生命周期法和投入产出法等[13]。消费者生活方式方法能够借助家庭消费支出与碳排放的矩阵关系对能源消耗进行分析，但计算中涉及大量微观调研数据，操作难度大且无法确定数据的准确性；生命周期法需要详细估算产品整个生命服务周期的数据，结果最精确但最费时。投入产出法借助投入-产出表将生产部门与消费碳排放有机地关联起来，能够准确反映两者间的关系，在世界

收稿日期： 2024-01-17；　**修订日期：** 2024-04-24
基金项目： 国家自然科学基金项目(72264035)；云南省兴滇英才青年人才专项项目资助
作者简介： 付伟(1986-)，女，博士，副教授，主要从事生态经济与可持续发展等方面的研究. E-mail: fuweiynlzd@126.com

范围内得到了普遍应用[14]，目前较多应用于居民消费间接碳排放的测算中。关于时空特征，随着研究视角的微观发展，空间因素被应用到碳排放的时空格局演变特征的研究中，多数学者基于空间计量模型研究环境、经济、城镇化水平等因素对碳排放的影响[15-16]，从地理邻近层面揭示家庭消费碳排放存在的空间异质性和关联性。从全局性角度而言，揭示的空间特征略显不足，难以进一步揭示在区域一体化背景下，家庭消费碳排放所呈现更复杂的空间联动效应。交叉学科的发展将在金融、贸易、人口迁移等[17-18]广泛应用的社会网络分析引入碳排放领域，不仅克服了空间计量的局限性还能从全局性角度刻画关联数据的空间关联特征[19]。

综上所述，目前关于家庭碳排放的研究颇丰，但从家庭消费间接碳排放角度出发探究其全局性空间关联特征较少。基于此，本文将引力模型和社会网络分析有机结合在一起，探究家庭消费间接碳排放的空间关联网络特征，以期借助区域间关联效应，带动要素流动，为制定家庭碳减排政策，实现跨区域协调治理提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

家庭消费间接碳排放量计算中所涉及的间接碳排放系数来源于2014—2023年《中国能源统计年鉴》和《中国投入产出表》中的按行业分能源消费量和各行业生产总值，鉴于投入产出表是5 a一公布，因此其余年份参考Mi等[20]方法进行调整计算。引力模型中所涉及人口、GDP等数据均来自2014—2023年《中国统计年鉴》，各省市间的距离是利用ArcGIS 10.7软件中的地理坐标系计算得出。

1.2 研究方法

在测算出各省市家庭消费间接碳排放量基础上，借助引力模型生成分析空间网络结构特征的关联矩阵，其中网络中的“点”代表省份、“线”代表关联。

1.2.1 家庭消费间接碳排放量测算 参照孙敏[21]将中国投入产出表和按行业分能源消费表中家庭生活消费类型划分成食品、衣着、居住、生活用品及服务、交通通信、教育文化娱乐、医疗保健和其他用品及服务八大类型(表1)。各类型所对应的间接碳排放系数是根据投入产出分析得出。

间接碳排放系数调整公式为：

$$F_z=\begin{cases}F_z & \begin{pmatrix} z=2015,2017,\\ 2018,2020\end{pmatrix}\\ \frac{4}{5}F_{2012}+\frac{1}{5}F_{2017} & (z=2013)\\ \frac{3}{5}F_{2012}+\frac{2}{5}F_{2017} & (z=2014)\\ \frac{1}{5}F_{2012}+\frac{4}{5}F_{2017} & (z=2016)\\ \frac{1}{2}F_{2018}+\frac{1}{2}F_{2020} & (z=2019)\\ F_{2020} & (z=2021,2022)\end{cases} \quad (1)$$

式中：F_z为第z年的间接碳排放系数(kg CO_2·元$^{-1}$)。

家庭消费间接碳排放量计算公式为：

$$C=\sum_{x=0}^{8}C_x=\sum_{x=0}^{8}E_x\times F_x \quad (2)$$

式中：C为家庭人均消费产生的间接碳排放量(t)；C_x为x种消费类型家庭人均消费间接碳排放量(t)；E_x为x种消费类型家庭人均消费支出(元)；F_x为x种消费类型家庭消费间接碳排放系数(kg CO_2·元$^{-1}$)。

1.2.2 空间关联网络分析法 空间关联网络分析法综合了空间相互作用理论和社会网络理论，是构建关联网络分析的基础[1,22]。空间相互理论认为任何城市不能孤立生存，为了维持正常运转与其他区域发生要素流动，Mayer等[23]则将“互补性、可达性和

表1 基于间接碳排放的消费类别

Tab. 1 Consumption categories based on indirect carbon emissions

消费性支出项目	涉及内容	间接碳排放系数/kg CO_2·元$^{-1}$
食品	农林牧渔产品及服务；食品和烟草	0.049
衣着	纺织品；纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	0.076
居住	非金属矿物制品；金属制品；电力、热力、燃气和水生产和供应；建筑	0.210
生活用品及服务	木材加工品和家具；电气机械和器材	0.068
交通通信	通信设备、计算机和其他电子设备；交通运输、仓储和邮政	0.198
教育文化娱乐	造纸印刷和文教体育用品	0.144
医疗保健	医药制品	0.117
其他用品及服务	批发和零售；住宿和餐饮	0.234

中介性"界定为空间相互作用发生的3个前提条件。家庭消费间接碳排放受到经济、技术等多重要素影响，在各省市间存在一定互补性；省域间完善的交通和信息网络，为要素流通创造了可达性条件；西部大开发、东北全面振兴和中部地区加快崛起等促进区域协调发展政策发挥中介效应，为各省空间交流搭建"桥梁"[1]。综上，中国家庭消费间接碳排放存在空间相互作用力，单一省市相关要素的变动均会引发空间关联网络的变动，巧妙运用这一作用力，能够促进资源合理配置，实现区域协调减排。社会网络理论是节点间相互关系构成的系统，节点在网络中的密度、位置和关联数量均会影响要素流动状态。因此，构建中国家庭消费间接碳排放空间关联网络，把握在空间相互作用力下要素流动的空间结构特征，对实现区域协同减排具有重要意义。

（1）空间关联网络构建

描述空间关联关系的模型主要由向量自回归模型和修正的引力模型构成，综合比较2种模型发现，前者数据敏感性强，易导致变量滞后产生结果偏差，后者能克服这一特点且综合考虑区域间经济和地理距离等因素，故选用引力模型构建空间关联矩阵。由于家庭消费间接碳排放涉及消费、收入等因素，故在引力模型公式中加入间接碳排放量、国民经济总值、人口规模等指标修正，具体公式为：

$$x_{ij}=\alpha_{ij}\frac{\sqrt[3]{P_iC_iG_i}\sqrt[3]{P_jC_jG_j}}{D_{ij}^2},\quad \alpha_{ij}=\frac{C_i}{C_i+C_j},\ \ D_{ij}^2=\left(\frac{d_{ij}}{g_i-g_j}\right)^2 \tag{3}$$

式中：x_{ij}为i、j省市间家庭消费间接碳排放关联程度；α_{ij}为i省市在i、j省市中间接碳排放的关联贡献率；D_{ij}为i、j省市间的经济距离；d_{ij}为i、j省市间的实际地理距离(km)；P_i、P_j分别为i、j省市年末人口数(10^4人)；C_i、C_j分别为i、j省市家庭消费间接碳排放量(10^4t)；G_i、G_j为i、j省市国民经济生产总值(10^8元)；g_i、g_j为i、j省市人均国民经济总值(元)。

基于式(3)得出表示各省市家庭消费间接碳排放的引力矩阵(31×31)，矩阵中元素数值代表间接碳排放的空间关联度，取引力矩阵中各行的均值作为阈值，与阈值进行比较，结果划分为2类：一类是数值大于阈值，记为1，表明行列所对应的区域彼此之间存在空间关联；另一类是数值小于阈值，记为0，表明行列所对应的区域彼此之间不存在空间关联[24]，构建出一个表示中国家庭消费间接碳排放的非对称空间关联网络矩阵。

（2）空间关联网络特征指标

社会网络分析是由多节点和多关系构成的集合，表达形式为$Y=\{V, E\}$，其中Y代表整体网络图，V、E代表节点和关系，此方法已经在多个领域获得广泛应用，成为空间关联网络特征的常用方法[25]。本文将其引入中国家庭消费间接碳排放空间网络动态演变研究，分别从整体网络特征、块模型特征以及个体网络特征3个角度展开分析(图1)。

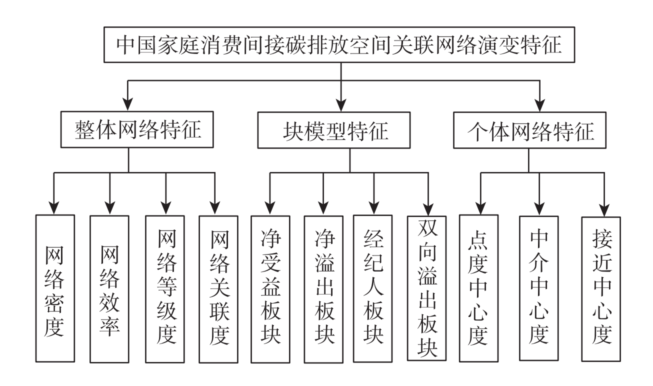


图1　空间关联网络结构分析框架

Fig. 1　Analysis framework of spatial correlation network structure

在整体网络特征方面，选用网络密度、等级度、效率、关联度作为指标，计算公式(表2)参考吉雪强等[1]。网络密度指家庭消费间接碳排放空间关联的紧密程度，节点间连线越多，密度越大，联系越密。网络等级度指各省间存在差异性，数值越大，等级梯度越明显。网络效率反映空间关联网络的稳定

表2　网络整体结构与个体结构特征指标

Tab. 2　Indices of overall network structure and individual structure characteristics

整体网络结构	公式	个体网络结构	公式
网络密度(T)	$T=R/N(N-1)$	点度中心度(C_{RD})	$C_{RD}=N/(N-1)$
网络等级度(H)	$H=1-K/K_{max}$	中介中心度(C_{RB})	$C_{RB}=\left[2\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{N}b_{jk}(i)\right]/(N^2-3N+2)$
网络效率(T)	$T=1-M/M_{max}$	接近中心度(C_{AP})	$C_{AP}=\left(\sum_{j=1}^{n}d_{ij}\right)/(N-1)$

注：N为网络节点个数；R为网络关联数量；K、K_{max}为对称可达点对数和最大对称可达点对数；M、M_{max}为冗余节点和最大冗余节点系数；$b_{jk}(i)$为两节点间的联系能力；d_{ij}为i、j省市间的实际地理距离(km)。

性，效率越高，整体网络越稳定。网络关联度反映空间稳健性，数值等于1表示关联性强。

在块模型特征方面，采用空间聚类方法分析板块间以及板块内部联系，参照Wasserman等[26]评价指标（表3），结合块模型原理划分成四大板块，分别为“双向溢出”“净受益”“净溢出”和“经纪人”，各板块间存在紧密联系，在网络中作用也截然不同[27]。

表3 块模型中的经济增长板块分类

Tab. 3 Classification of economic growth segments in block model

位置内部的关系比例	位置接受到的关系比例	
	≈0	<0
$\geq(s_k-1)/(s-1)$	双向溢出板块	净受益板块
$<(s_k-1)/(s-1)$	净溢出板块	经纪人板块

注：s_k为板块内省市数量；s为空间关联网络中所有省市数量。

在个体网络特征方面，包含点度中心度、中介中心度和接近中心度。点度中心度评估节点间的链接能力，数字越大影响力越高。中介中心度衡量节点间沟通能力，数字越大，地位越重要。接近中心度不受其他节点控制能力，数字越大，收集和传递能力越强。

2 结果与分析

2.1 中国家庭消费间接碳排放量分析

从整体间接碳排放量角度来看，2013—2022年呈现波动上升趋势，但增速较缓。家庭人均间接碳排放量由2013年的4.57 t增长至2022年的10 t，10 a间增长了约1.2倍（图2）。具体原因：一方面是经济增长和扩大内需战略，间接拉动人们对高质量和个性化消费的需求，带动家庭消费间接碳排放量增长，因此整体处于上升状态；另一方面是2015年生态文明建设提出后引发了社会各界关注，一系列减排措施在各个行业实施，在一定程度上转变了居民的消费方式，抵消了一部分收入增加所引发的间接碳排放量，因此增长趋势较为平缓，而2020年受新冠疫情影响，行业停产、家庭缩支，导致家庭消费间接碳排放量明显降低。

从个体家庭消费类别角度来看，“食品”“居住”“交通通信”和“教育文化娱乐”为主要构成部分，占总量的75%以上，其中“居住”类消费不断增长，“食

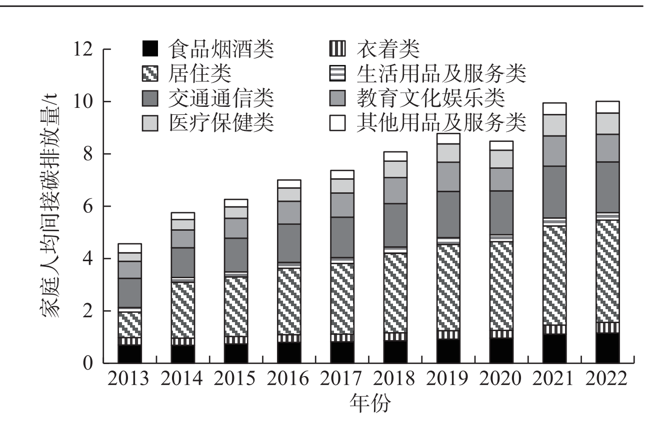


图2 中国家庭人均间接碳排放量

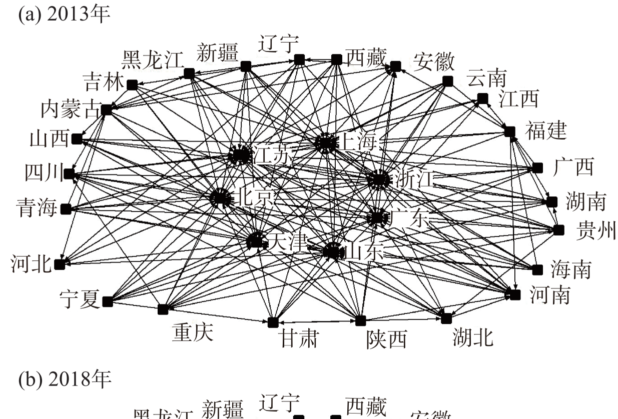
Fig. 2 Indirect carbon emissions per capita from household consumption in China

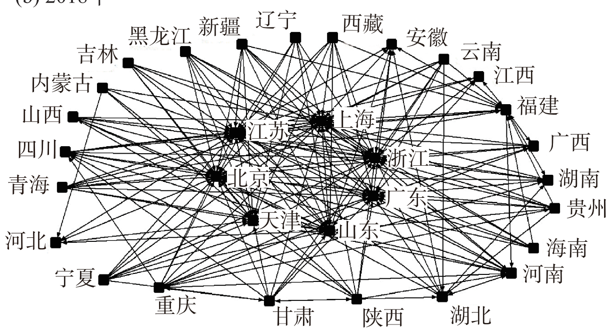
品”类变化相对平缓，“教育文化娱乐”和“交通通信”除2020年短暂下降外均呈上升趋势。具体原因是：“食品”“居住”涉及民生大计，是人们关注的重点层面。随着生活水平提升，在食品消费领域的需求开始呈多元化趋势，从满足温饱过渡到膳食均衡，导致口粮式消费下降，蛋、奶、肉制品非主粮消费增多，两者此消彼长趋势，加上可持续发展背景下食品生产也倾向于绿色低碳。因此“食品”消费碳排放量整体变化幅度不大，仅从2013年的人均0.70 t演变到2022年的人均1.15 t。“居住”类消费在城镇化比重上升和农村房屋翻新等多重因素影响下，比重不断上升。“教育文化娱乐”和“交通通信”类消费在人们日益增长的美好生活需求影响下，享受式消费以及旅游、外出频次增多，除2020年受疫情影响，其余年份增长势头明显。

2.2 中国家庭消费间接碳排放的空间关联结构分析

运用UNCINET6.0和NETDRAW对2013—2022年中国家庭消费间接碳排放进行可视化分析，分别从整体网络特征、块模型特征和个体网络特征3个方面展开。由于篇幅限制，整体网络图截取2013、2018年和2022年数据进行分析，块模型和个体网络截取2022年数据分析。

2.2.1 整体网络特征 从整体关联结构角度来看（图3），各省市家庭消费间接碳排放存在显著的空间相互作用力，区域间关联突破传统地理邻近区位限制，呈现更复杂的全局性关联。其中，江苏、北京、浙江、上海等省市处于网络核心位置，关联数高于其余省市，整体网络呈现“核心-边缘”分布趋势。





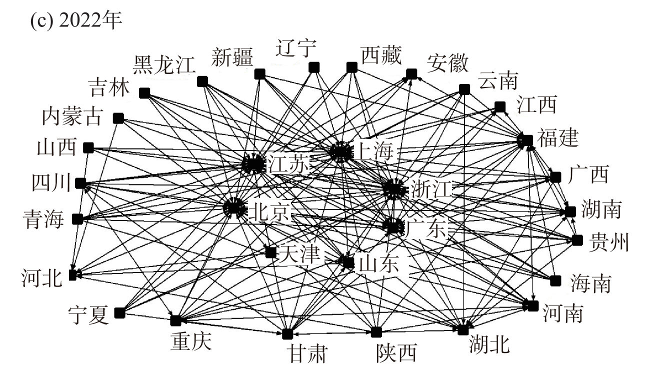


图3　中国家庭消费间接碳排放整体关联结构

Fig. 3　Overall correlation network of indirect carbon emissions from household consumption in China

从局部关联结构角度来看，山东、江苏、北京、浙江、广东、上海等省市位于“环渤海”“长三角”和“珠三角”经济圈内，交通区位和经济发展水平均位居前列，家庭消费水平和生活质量普遍较高，对蛋奶肉类等高碳排放食品和旅游出行等文娱活动方面需求较多。对内凭借自身先进低碳技术、基础设施和资本优势吸引人口流入和贸易交流，间接促进人口密集度增加，对于住房、交通、食物等日常消耗也增多。对外输出低碳技术和高能耗产业，促进了周边区域经济发展，提高家庭生活水平，因此这些省市位于空间关联网络的核心位置，与其余省市保持密切联系。广西、青海、内蒙古、宁夏等中西部地区经济发展水平较低、内部基础设施尚未健全，家庭消费明显处于较低水平，对外部省市劳动力和产业吸引力小，因此处于空间关联网络的“边缘”区域。在西部大开发政策和天然地理环境的双驱动下，季节性旅游人口增多和促进区域间贸易交流，一定程度上影响居民消费结构，所以空间上仍存在相应关联连线。综上，中国家庭消费碳减排需要以空间关联网络中的核心省市为突破口，对内继续研发低碳技术，促进绿色产业发展，倡导高质量家庭生活消费，从根本上减少间接碳排放量；对外通过区域间关联效应将资本、节能技术、清洁能源等辐射各省市，促进区域经济发展的同时实现协调减排。“边缘”省市需要借助西部大开发、东北全面振兴等政策发展内部经济实施，改善基础设施，在提高家庭生活水平的同时引导其向绿色低碳型发展。

从网络密度和关联数来看(图4)，网络关联数呈波动下降趋势，总数维持在180~230之间，说明各省市在间接碳排放方面的关联程度尽管有松散趋势，但联系仍十分紧密，即使达到最大关联数223仍与最大可能值930(31×30)有差距，也从侧面反映家庭消费间接碳排放在空间关联方面发展潜力较大。网络关联度为1，表明网络内各节点均存在一定联系，无不可达点数，整体网络处于较稳健的联系之中。网络密度整体处于较低水平，由2013年的0.24下降为2022年的0.21，演变幅度小，说明区域间相互作用力较弱，有待进一步加强。具体原因：一是经济差异，地区经济和低碳技术水平差距大，导致家庭消费观念不同，成为阻碍区域间要素流通的因素之一，因此整体关联数呈下降趋势。二是政策影响，2013—2016年在生态文明建设相关政策影

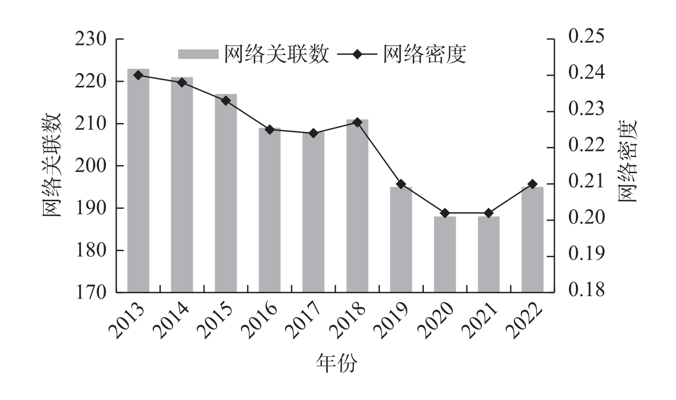


图4　家庭消费间接碳排放空间网络密度与关联数

Fig. 4　Spatial network density and number of associations of indirect carbon emissions from household consumption

响下消费观念发生转变、高碳产业开始转型间接影响家庭消费选择，间接碳排放量减少导致网络密度有下降趋势。2017—2018年，在"六大消费工程""十大扩消费行动"推动下注重追求享受型生活，家庭消费量增加，网络密度短暂式上升。三是疫情干扰，2019—2020年，在新冠疫情影响下，行业停产，家庭缩支，家庭消费支出和空间关联密度呈现断崖式下降，随着疫情后经济逐步复苏，预计将会迎来新一轮的升高。

从网络等级度和效率来看(图5)，两者均呈波动上升趋势。网络等级度从2013年的0.64上升至2022年的0.68，表明中国家庭消费间接碳排放等级梯度明显，处于中心位置的节点对整体网络"控制"力增强。从整体关联结构(图3)也可以看出，山东、广东、福建中心地位逐渐瓦解，上海、江苏、浙江、北京的中心效应增强，这是由于东部沿海省份经济、地理和技术优势，对其他节点的影响和辐射度强，尤其是数字经济背景下，对基础设施和信息化水平要求较高，导致省市间等级梯度增加，2017年和2019年分别受区域协调发展政策和疫情影响，家庭消费差距有缩小趋势，等级度也有所下降。网络效率从2013年的0.65变化到2022年的0.70，说明网络

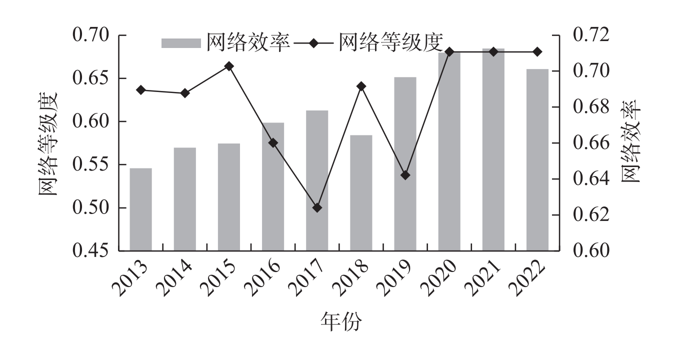


图5 家庭消费间接碳排放空间网络等级度与网络效率

Fig. 5 Spatial network hierarchy and network efficiency of indirect carbon emissions from household consumption

内部关联连线有所减少，是由于扩大内需战略潜移默化改变了居民消费和出行方式，拉大区域消费差距，在一定程度上阻碍要素流动，导致内部关联连线有所减少。

2.2.2 块模型特征 为进一步了解家庭消费间接碳排放空间内部的角色和关联关系，采用CONCOR迭代方法，将收敛指数、分割度设置为0.2和2.0[28]，将省市按照空间关联网络特点分为四大板块(表4和图6)，其中板块内部关联数为29，板块间的关联数为166。

从板块结构特征和溢出效应可以看出，(1)净受益板块包含北京、江苏、上海、浙江。溢出和接收关系数分别为16和98，接收效应远强于溢出效应占主导作用，因此属于"净受益"板块。由于板块内省市经济发展水平位于中国前列，居民注重高质量的生活方式，产生的家庭消费明显高于其余省市，同时凭借自身完备的基础设施、便利的交通通信和创业就业机会等条件吸引了大量产业入驻、劳动力流入，板块接收效应较强。(2)净溢出板块包含甘肃、广西、贵州、海南、黑龙江、湖南、吉林、江西、辽宁、宁夏、青海、西藏、新疆、云南、重庆、四川、陕西、安徽、河南。溢出关系数远高于接收关系数，多位于北部和中西部，经济发展相对缓慢，以能源业或种植业为主，对劳动力和产业吸引力较弱。对内依靠天然能源优势吸引其他省市资金、产业和技术等要素注入，对外通过人口流出、产品外销等方式提升收入，省市内人口、产业数量相对较少，以溢出关系为主。(3)经纪人板块包含河北、内蒙古、山西、天津、山东。接收和溢出关系数为11和15，溢出关系介于一和四板块中间，属于"经纪人"板块。这些省市区域位置重要，分别位于"长三角""京津冀""一带一路"等经济圈枢纽，是各省联系的"桥梁"，不仅接收周边经济水平高省份溢出，还向其他省市发送

表4 2022年空间关联板块的溢出效应

Tab. 4 Spillover effects of spatially correlated sectors in 2022

板块	接收关系		发出关系		期望内部关系比例/%	实际内部关系比例/%	板块属性
	板块内	板块外	板块内	板块外			
第一板块	6	98	6	16	10.00	27.27	净受益
第二板块	16	20	16	115	60.00	12.21	净溢出
第三板块	5	11	5	15	13.33	25.00	经纪人
第四板块	2	37	2	20	6.67	9.09	双向溢出

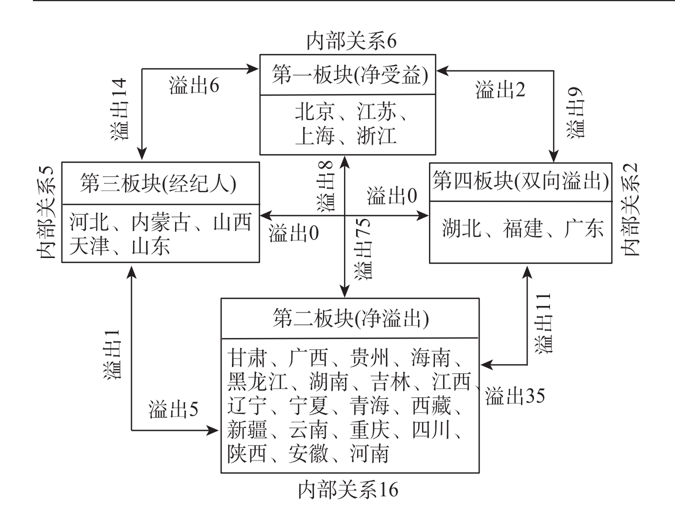


图6　2022年空间块模型结构

Fig. 6　Structure of the space block model in 2022

关系。(4) 双向溢出板块包含福建、广东、湖北。满足实际内部关系比例大于期望内部关系比例的要求,同时兼顾内外联系且差距小,属于"双向溢出"板块。原因是板块内省份位于近东南沿海地区,对内经济水平较高、资源丰富、交通便捷使家庭生活幸福指数较高,人口流动外溢状况不明显,省内关联效应较好。对外凭借良好的经济和区位优势对其他省份的吸引力较高,与外部省市也保持密切联系。

总体上家庭消费间接碳排放空间关联板块存在紧密关联,区域间联动效应好。可以借助板块间接收和溢出效应,促进区域低碳技术、绿色观念的传递,实现区域协调发展,提升家庭生活水平,减少家庭消费碳排放。

2.2.3　个体网络特征　为进一步探究各省市在间接碳排放空间网络作用力,分别从点度中心度、中介中心度、接近中心度进行分析(表5)。

(1) 从点度中心度来看,排名前5位的省市是江苏、上海、浙江、北京、广东,与其他省市之间存在着较强的空间关联,尤其是江苏点度中心度指数达到了90.00,成为了空间关联网络的中心。客观原因是江苏省与其他省市存在紧密的关联关系,受益关系数大于溢出关系数。主观原因是排名靠前的省市位于环渤海、京津冀、长三角经济圈之中,资金、技术和地理位置都占有绝对优势,与其余省市在低碳关联中阻碍屏障少,能够更好地发挥网络中心作用,向外溢出低碳技术、资金和绿色消费观念等要素,转变居民消费习惯,向内吸纳人才、劳动力等,使各省市间处于紧密联系之中。排名相对落后的

表5　2022年空间关联网络的中心性分析结果

Tab. 5　Centralization analysis results of spatially correlated networks in 2022

省市	点出度	点入度	点度中心度	中介中心度	接近中心度
江苏	27	27	90.00	63.30	90.91
上海	27	27	90.00	58.24	90.91
北京	25	25	83.33	74.74	85.71
浙江	25	25	83.33	44.90	85.71
广东	18	18	60.00	14.47	71.43
福建	17	17	56.67	16.32	68.18
甘肃	12	12	40.00	3.85	62.50
湖北	12	12	40.00	3.45	62.50
重庆	10	10	33.33	1.59	60.00
河南	10	10	33.33	2.39	60.00
山东	10	10	33.33	8.04	60.00
湖南	10	10	33.33	1.02	60.00
四川	9	9	30.00	0.91	58.82
广西	9	9	30.00	0.91	58.82
贵州	9	9	30.00	0.91	58.82
陕西	8	8	26.67	2.47	57.69
河北	7	7	23.33	3.59	56.60
云南	7	7	23.33	0.56	56.60
青海	7	7	23.33	0.56	56.60
宁夏	6	6	20.00	0.37	55.56
黑龙江	6	6	20.00	0.27	55.56
新疆	6	6	20.00	0.37	55.56
海南	6	6	20.00	0.37	55.56
西藏	6	6	20.00	0.37	55.56
山西	5	5	16.67	0.58	54.55
吉林	5	5	16.67	0.13	54.55
安徽	5	5	16.67	0.37	54.55
内蒙古	5	5	16.67	0.29	53.57
辽宁	4	4	13.33	0.13	53.57
江西	4	4	13.33	0.12	53.57
天津	3	3	10.00	0.00	50.85
均值	10	10	34.41	9.86	61.77

省份如安徽、内蒙古、辽宁、江西、天津,与其他省市关联较少,空间网络结构不密切。安徽人口多、经济发展相对缓慢,在满足内需时外扩相对困难;内蒙古、江西则是自身资源及经济发展限制导致;辽宁是受地理区位限制;天津人口多,经济结构的调整使工业"领头羊"的优势弱化,无法居于空间网络中心位置。从点入度和点出度来看,分别表示省份受益与溢出关系数,点度中心度排名靠前的省市是受益度占上风,相反排名靠后的则是溢出较多,侧面反映了东部发达地区通过空间关联关系带动西

部和中部欠发达地区发展。

（2）从中介中心度来看，排名靠前的省市分别是北京、江苏、上海、浙江，数值远高于平均值，呈现出较强的"中介"效应，担任空间关联网络中的"桥梁"，切断这几个省市会阻碍空间关联网络的连通性。北京、江苏、上海、浙江的经济、地理区位优势以及科技等优势对要素的接收和辐射有绝对的掌控能力，所以在间接碳排放空间关联网络中处于枢纽地位，对周边要素的吸引力提升，成为省市间联系的"桥梁"。从中心度大小来看，数值相差较大，差距达到70%以上，说明各省市间接碳排放存在空间异质性，要想实现各省市碳排放符合要求，仍需要发挥中介中心度较强省市的"中介"作用。

（3）从接近中心度来看，能够衡量出空间关联网络的全局中心性，分析出各省市之间的接近程度。如江苏接近中心最高为90.91，表明江苏就是关联网络中心，与关联省市距离越近获取信息越多，且接近中心度变化幅度小于中介中心度，说明随着区域一体化，接近中心度呈上升趋势，联系也在逐渐增多，可以利用越来越紧密的联系驱动低碳产业推广。

3 讨论

不同于以往学者仅关注直接碳排放区域间的关联效应或者家庭消费碳排放影响因素[3,5,6,22]，缺乏家庭消费碳排放空间依赖性分析，本研究以家庭消费视角为切入口，重点探究间接碳排放的空间关联效应，根据各省市在网络中的密度、位置和关联数量，把握在空间相互作用力下要素流动的空间特征，促进区域协调减排。空间关联方面，家庭消费间接碳间接排放与王晓平等[22]、孙亚男等[29]的研究结果一致，各省碳排放要素在空间相互作用力下存在复杂关联，但家庭消费碳排放敏感性更强，易受政策、居民消费观念和技术水平影响，因此网络密度和等级度变化幅度更大。同时，直接碳排放能够借助低碳技术、资金等要素流动实现碳差距缩小，而各省市经济水平和消费观念会持续拉大间接碳排放量，导致网络等级度与直接碳排放呈反向变动趋势。家庭消费量方面，不同于彭璐璐等[4]、史琴琴等[5]聚焦于探究经济、人口、技术等影响效应，从影响因素角度制定微观方案，揭示的空间特征也多局限于地理邻近区域。本研究发现要素关联已经突破了"邻近"区域限制，传统影响因素不足以适用于全局性减排，因此根据各省市在空间网络中的位置和接收溢出效应对要素流动的影响，制定全局性协调减排措施。

4 结论与建议

4.1 结论

（1）家庭消费间接碳排量方面，整体呈现波动增长的状态，10 a间增长了约1.2倍。"食品""居住""交通通信"和"教育文化娱乐"占总量的75%以上，其中"居住"类消费处于不断增长的状态，"食品"类相对比较平缓，"教育文化娱乐"和"交通通信"除2020年经历短暂下降外均呈上升趋势。

（2）整体网络特征：突破了地理邻近范围限制，呈现更密切的空间关联；网络密度和关联数均有下降趋势，说明受经济、政策影响空间相互作用力有所减弱，阻碍要素流动。网络等级度和效率数值高且呈上升趋势，说明以上海、江苏、北京、浙江为主导中心格局等级梯度显著，对整体网络的"控制"地位和要素吸引力强。网络效率增加反映受消费政策影响，在提高国内市场消费水平的同时也间接拉大了居民消费差距，消费观念和方式不同阻碍了要素流动，导致内部关联连线有所减少。

（3）块模型特征："净受益"板块说明接收效应大于溢出效应，受益明显，板块内省市经济发展水平高但资源禀赋差，在接收人才、能源等要素流入的同时，也为其余板块提供资金、技术支持。"净溢出"板块说明溢出效应明显，经济水平较低但具备资源优势。"经纪人"板块说明板块内省市交通区位便捷，为板块间要素流动搭建"桥梁"。"双向溢出"板块说明地理位置和资源禀赋均较好，能够同时兼顾溢出和接收效应。

（4）个体网络特征：呈现"中心–边缘"关联趋势。江苏、北京、上海、浙江等省市处于空间关联网络的中心位置，点度中心度、接近中心度以及中介中心度均高于其余省市，对要素吸引力强，作为要素聚集地能够与其余省市快速建立关联，而处于空间关联边缘区域的省市，中心度普遍较低，非均衡发展现象突出，对要素引力小，需要依靠"中心"省市溢出效应带动发展。

4.2 建议

基于上述研究结果，提出以下建议：

(1) 优化家庭消费结构，推动居民消费观念向低碳转变，从源头减少生活消费碳排放；打破区域间行政限制，用全局性目光看待家庭消费间接碳排放，构建“全国一盘棋”的区域协调治理碳排放局面，逐一从网络关系数、网络效率、网络等级度突破，提升区域关联，带动要素流动，强化区域间互惠性关联。

(3) 推动数字经济与实体产业的融合，促进信息化发展。上海、江苏、浙江等数字化程度较高的省市应借助自身区位和经济优势向周边省市溢出相关要素促进信息化发展。内蒙古、新疆、云南等省份应抓住接收经济发达省份溢出要素带来的机遇，调整板块内部的经济结构，完善基础设施建设，为内部信息化快速发展奠定基础。

(4) 发挥省份在空间关联网络发挥“引领-跟随”作用。中心省市通过技术交流、生态补偿等方式将低碳产业或技术辐射到其余省市，带动边缘区域的发展。其余省市在“跟随”中心省市发展过程中，可以取长补短带动区域地方发展，缩小综合水平差距。个体内部也要注重碳减排措施的实施，处于网络核心的省市应尽量减少对边缘省份化石能源的依赖，提高清洁能源消费比重。处于网络边缘区域的省市在接收核心省份溢出的低碳技术同时要注重提高自身产业布局的“绿色”门槛。

参考文献(References)

[1] 吉雪强, 张跃松. 长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络结构及动因[J]. 自然资源学报, 2023, 38(3): 675-693. [Ji Xueqiang, Zhang Yuesong. Spatial correlation network structure and drivers of carbon emission efficiency of plantation industry in Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(3): 675-693.]

[2] 华怡婷, 石宝峰. 互联网使用与家庭间接碳排放: 测度及影响因素分析[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2023, 29(1): 117-134. [Hua Yiting, Shi Baofeng. Internet use and household indirect carbon emissions: Measurement and influencing factors analysis[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2023, 29 (1): 117-134.]

[3] 邵帅, 徐俐俐, 杨莉莉. 千里“碳缘”一线牵: 中国区域碳排放空间关联网络的结构特征与形成机制[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(4): 958-983. [Shao Shuai, Xu Lili, Yang Lili. Structural characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of regional carbon emissions in China[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2023, 43(4): 958-983.]

[4] 彭璐璐, 李楠, 郑智远, 等. 中国居民消费碳排放影响因素的时空异质性[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 463-472. [Peng Lulu, Li Nan, Zhang Zhiyuan, et al. Spatial-temporal heterogeneity of influencing factors of carbon emissions from Chinese household consumption[J]. China Environmental Science, 2021, 41(1): 463-472.]

[5] 史琴琴, 鲁丰先, 陈海, 等. 中原经济区城镇居民消费间接碳排放时空格局及其影响因素 [J]. 资源科学, 2018, 40(6): 1297-1306. [Shi Qinqin. Lu Fengxian, Chen Hai, et al. Temporal-spatial patterns and factors affecting indirect carbon emissions from urban consumption in the Central Plains economic region[J]. Resources Science, 2018, 40(6): 1297-1306.]

[6] 李治, 李培, 郭菊娥, 等. 城市家庭碳排放影响因素与跨城市差异分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(10): 87-94. [Li Zhi, Li Pei, Guo Ju'e, et al. Analysis of factors influencing urban household carbon emissions and cross-city differences[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(10): 87-94.]

[7] 庄贵阳, 魏鸣昕. 城市引领碳达峰、碳中和的理论和路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 114-121. [Zhuang Guiyang, Wei Mingxin. Theory and pathway of city leadership in emission peak and carbon neutrality[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 114-121.]

[8] Belaid F, Rault C. Energy expenditure in Egypt: Empirical evidence based on a quantile regression approach[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2021, 26(4): 511-528.

[9] 韩君, 牛士豪, 高瀛璐. 新发展阶段居民家庭碳排放核算及影响因素研究[J]. 兰州财经大学学报, 2023, 39(1): 68-80. [Han Jun, Niu Shihao, Gao Yinglu. Research on accounting and influencing factors of household carbon emissions in the new development stage[J]. Journal of Lanzhou University of Finance and Economics, 2023, 39(1): 68-80.]

[10] Bin S, Dowlatabadi H. Consumer lifestyle approach to US energy use and the related CO_2 emissions[J]. Energy Policy, 2005, 33(2): 197-208.

[11] Fan J, Guo X, Marinova D, et al. Embedded carbon footprint of Chinese urban households: Structure and changes[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 33: 50-59.

[12] 范玲, 汪东. 我国居民间接能源消费碳排放的测算及分解分析[J]. 生态经济, 2014, 30(7): 28-32. [Fan Ling, Wang Dong. Calculation and decomposition analysis on carbon emissions of indirect residents' consumption in China[J]. Ecological Economy, 2014, 30 (7): 28-32.]

[13] 陈为公, 程准, 张娜, 等. 山东省农村居民生活间接碳排放影响因素[J]. 沈阳大学学报(社会科学版), 2021, 23(3): 273-278, 286. [Chen Weigong, Cheng Zhun, Zhang Na, et al. Influencing

factors of indirect carbon emissions in rural residents in Shandong Province[J]. Journal of Shenyang University (Social Science Edition), 2021, 23(3): 273-278, 286.]

[14] 吴茜, 陈强强. 甘肃省行业碳排放影响因素及脱钩努力研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 274-283. [Wu Xi, Chen Qiangqiang. Influencing factors and decoupling efforts of industry-related carbon emissions in Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 274-282.]

[15] 吴开亚, 王文秀, 张浩, 等. 上海市居民消费的间接碳排放及影响因素分析[J]. 华东经济管理, 2013, 27(1): 1-7. [Wu Kaiya, Wang Wenxiu, Zhang Hao, et al. Indirect carbon emissions of Shanghai's residents consumption and its influence factors[J]. East China Economic Management, 2013, 27(1): 1-7.]

[16] 杜娅明, 白永平, 梁建设, 等. 黄河流域旅游业碳排放效率综合测度及影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(12): 2074-2085. [Du Yaming, Bai Yongping, Liang Jianshe, et al. Comprehensive measurement and influencing factors of carbon emission efficiency of tourism in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(12): 2074-2085.]

[17] 邹嘉龄, 刘卫东. 2001—2013年中国与"一带一路"沿线国家贸易网络分析[J]. 地理科学, 2016, 36(11): 1629-1636. [Zou Jialing, Liu Weidong. Trade network of China and countries along "Belt and Road Initiative" areas from 2001 to 2013[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(11): 1629-1636.]

[18] Liu W, Xu J, Li J. The influence of poverty alleviation resettlement on rural household livelihood vulnerability in the western mountainous areas[J]. Sustainability, 2018, 10(8): 2793, doi: 10.3390/su10082793.

[19] 邵璇璇, 姚永玲. 长江中游城市群的空间网络特征及其影响机制 [J]. 城市问题, 2019, 10: 15-26. [Shao Xuanxuan, Yao Yongling. Spatial network characteristics and influence mechanisms of city clusters in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Urban Problems, 2019, 10: 15-26.]

[20] Mi Z, Meng J, Green F, et al. China's "exported carbon" peak: Patterns, drivers, and implications[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45: 4309-4318.

[21] 孙敏, 杨红娟, 刘海洋. 少数民族农户生活消费间接碳排放影响因素研究[J]. 经济问题探索, 2016(5): 51-58. [Sun Min, Yang Hongjuan, Liu Haiyang. Research on influencing factors of indirect carbon emissions from household consumption of ethnic minority farmers[J]. Exploration of Economic Issues, 2016(5): 51-58.]

[22] 王晓平, 冯庆, 宋金昭. 成渝城市群碳排放空间关联结构演化及影响因素[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 4123-4134. [Wang Xiaoping, Feng Qing, Song Jinzhao. The spatial association structure evolution of carbon emissions in Chengdu-Chongqing urban agglomeration and its influence mechanism[J]. China Environmental Science, 2020, 40(9): 4123-4134.]

[23] Mayer H M, Ullman E L. American commodity flow: A geographical interpretation of rail and water traffic based on principles of spatial interchange[J]. Geographical Review, 1959, 49(1): 142, doi: 10.2307/211582.

[24] 孙中瑞, 樊杰, 孙勇, 等. 中国绿色科技创新效率空间关联网络结构特征及影响因素[J]. 经济地理, 2022, 42(3): 33-43. [Sun Zhongrui, Fan Jie, Sun Yong, et al. Structural characteristics and influencing factors of spatial correlation network of green science and technology innovation efficiency in China[J]. Economic Geography, 2022, 42(3): 33-43.]

[25] 赵林, 高晓彤, 刘焱序, 等. 中国包容性绿色效率空间关联网络结构演变特征分析[J]. 经济地理, 2021, 41(9): 69-78, 90. [Zhao Lin, Gao Xiaotong, Liu Yanxu, et al. Evolution characteristics of inclusive green efficiency spatial association network structure in China[J]. Economic Geography, 2021, 41(9): 69-78, 90.]

[26] Wasserman S, Faust K. Social network analysis: Methods and applications[J]. Contemporary Sociological, 1994, 91: 219-220.

[27] 杨上广, 王春兰, 刘淋. 上海家庭出行碳排放基本特征、空间模式及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(6): 148-153. [Yang Shangguang, Wang Chunlan, Liu Lin. Study on the basic characteristics, spatial patterns and influencing factors of carbon emissions of household travel in Shanghai[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(6): 148-153.]

[28] 刘英恒太, 杨丽娜. 中国数字经济产出的空间关联网络结构与影响因素研究[J]. 技术经济, 2021, 40(9): 137-145. [Liu Yinghengtai, Yang Lina. Research on the structure and influencing factors of spatially correlate network of China's digital economy output[J]. Technology Economics, 2021, 40(9): 137-145.]

[29] 孙亚男, 刘华军, 刘传明, 等. 中国省际碳排放的空间关联性及其效应研究——基于SNA的经验考察[J]. 上海经济研究, 2016(2): 82-92. [Sun Yanan, Liu Huajun, Liu Chuanming, et al. Study on spatial correlation and effect of interprovincial carbon emissions in China: An empirical investigation based on SNA[J]. Shanghai Economic Research Journal, 2016(2): 82-92.]

Evolution of spatial correlation structure of indirect carbon emissions from household consumption in China: Based on social network analysis

FU Wei[1], GONG Haixiu[1], CHEN Jiancheng[2]

(1. College of Economics and Management, Southwest Forestry University, Kunming 650233, Yunnan, China;
2. College of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Understanding the spatial clustering and structural characteristics of indirect carbon emissions from household consumption is crucial for China to achieve the "carbon peaking and carbon neutrality" goal under its new development framework. This study calculates indirect carbon emissions from household consumption in China and examines the structural characteristics of the spatial correlation network for these emissions from 2013 to 2022 using social network analysis. The findings reveal the following: (1) Indirect carbon emissions from household consumption exhibit an overall upward trend, increasing 1.2-fold over ten years. Emissions from "food", "housing", "transport and communication", and "education, culture, and entertainment" constitute 75% of the total. (2) Overall network characteristics: The overall network structure, centered on provinces and cities such as Jiangsu Province, Beijing City, Zhejiang Province, and Shanghai City, demonstrates a "core-edge" distribution pattern. Network density and the number of associations have declined, while grade gradient and association intensity have increased. (3) Characteristics of the block model: Regional network characteristics, based on node spillover and reception effects, are categorized into four segments: "net spillover", "net benefit", "broker", and "two-way spillover", and each segment plays different roles in the field of spatial correlation. (4) Individual network characteristics: Regarding individual network characteristics, provinces such as Shanghai City, Jiangsu Province, and Zhejiang Province, with the highest degree of centrality, occupy the core areas of the correlation network and exhibit significant spatial correlation and outward radiation effects. In contrast, provinces such as Qinghai Province and Heilongjiang Province, located on the periphery, exhibit weaker correlation effects.

Key words: indirect carbon emissions from household consumption; spatially associative networks; social network analysis; gravitational model